溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响

池玉蕾, 石烜, 任童, 王晓昌, 金鹏康*
(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 为了阐明溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮除磷性能的影响,研究了供氧区溶解氧浓度分别为2~3、1~2和低于1 mg·L^{-1}的运行条件下微生物应对低碳源环境生长与代谢特性的差异. 随着供氧区溶解氧浓度的降低利用外碳源和内碳源脱氮量分别升高了20.23%和80.54%,内碳源的除磷利用效率升高了13.89%,进而使低碳源城市污水的脱氮除磷效果得到强化. 高通量测序和RDA分析结果表明,降低供氧区溶解氧浓度驱动微生物群落结构的调整,促使脱氮除磷功能微生物(如: *Dechloromonas* 菌属)的丰度显著增加. 基于PICRUSt预测分析可知,在低溶解氧浓度的运行环境中微生物与基质利用、能量合成和代谢调控功能相关的基因活性更高,保证了功能微生物在低碳源条件下稳定生长并维持较高的脱氮除磷效率. 本研究为提升低碳源城市污水处理系统中脱氮除磷功能微生物的生长提供理论依据.

关键词: 低碳源; 城市污水; 溶解氧(DO); 微生物群落; 代谢机制
中图分类号: X172; X703 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2021)09-4374-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202012261

Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process

CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, WANG Xiao-chang, JIN Peng-kang*
(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: To explore the effects of dissolved oxygen (DO) on the treatment of low carbon/nitrogen municipal wastewater, this study examined the characteristics of the microbial community in a low carbon source environment. The treatment process was conducted with the aeration area having DO concentrations of 2-3, 1-2, and lower than 1 mg·L^{-1}. The results demonstrated that reduced DO concentration in the aeration area increased the efficiency of the nitrogen removal process by 20.23% and 80.54%, for external and internal carbon sources, respectively. Similarly, the efficiency of internal carbon source utilization in the phosphorus removal process increased by 13.89%, thus enhancing the nutrient removal efficiency of the low carbon/nitrogen wastewater treatment system. High-throughput sequencing and RDA analysis showed that reduced oxygen concentration motivated an adjustment in microbial community structure, causing functional microorganisms (i.e., *Dechloromonas*) to become dominant. In addition, the upregulation of genes associated with energy production and conversion, signal transduction, substrate transport, and metabolism provided favourable nutritional conditions for the proliferation of functional microorganisms in low carbon source conditions. This study provides a theoretical basis for improving the growth of microorganisms involved in the nutrient removal process when treating low carbon/nitrogen municipal wastewater.

Key words: low carbon source; municipal wastewater; dissolved oxygen (DO); microbial community; metabolic mechanism

目前,我国城市污水厂普遍存在进水碳源浓度低的问题[1,2]. 碳源不充足的条件下,碳源利用效率低的脱氮除磷功能细菌难以生长,因而导致低碳源污水的处理效率下降,影响水环境的稳定[3,4]. 因此,探究强化功能细菌碳源利用效率的运行策略引起广泛的关注[5,6]. 许多研究通过优化处理过程中的溶解氧(dissolved oxygen, DO)分布条件强化功能细菌生长[7,8],其中,改变供氧区DO浓度为最常用的优化策略之一[9,10]. Wang等[11]的研究利用低DO浓度环境对功能细菌群落结构的调整作用,实现低碳源城市污水的稳定处理. Keene等[12]的研究通过采用阶段式降低DO浓度的运行策略,在DO浓度约为0.3 mg·L^{-1}的城市污水处理系统中实现功能细菌的强化. DO浓度对脱氮除磷功能细菌群落结构和代谢特性的影响是引起低碳源城市污水处理性能差异的深层原因[13,14]. 但现有研究中少有深度探究低碳源条件下DO浓度对微生物群落的影响.

为了探究DO浓度对低碳源城市生活污水处理系统的影响,本研究构建了供氧区DO浓度逐阶降低的3种运行模式,并对比了不同DO浓度下低碳源城市污水处理效果和氮磷污染物去除途径. 采用高通量测序和RDA统计学分析方法,对DO浓度变化与功能细菌群落结构演替进行关联分析. 最后,基

收稿日期: 2020-12-27; **修订日期**: 2021-03-03
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400701); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016TZC-S-19-3)
作者简介: 池玉蕾(1990~),女,博士,主要研究方向为城市污水深度脱氮除磷, E-mail: maisui1956@126.com
* 通信作者, E-mail: pkjin@hotmail.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

于功能基因预测与 COG 数据库比对,分析了不同 DO 浓度条件下微生物的代谢特性差异,并阐明 DO 浓度对微生物群落结构与低碳源污水处理特性的影响机制.

1　材料与方法

1.1　反应器运行工况

采用 SBR 反应器进行 DO 浓度影响分析的实验,反应器的有效体积为 8 L. 根据供氧区 DO 浓度的差异,将反应器的运行工况分为 3 个阶段(图 1) . 第 1 阶段(第 1 ~40 d) ,每循环总时长为 6 h,包含进水段(10 min, 2 L) 、厌氧段(60 min) 、硝化液回流(10 min, 4 L) 、缺氧段(120 min) 、供氧段(120 min) 、静置(10 min) 和排水段(10 min, 2 L) ,供氧区 DO 浓度设置为 2 ~3 mg•L^{-1}. 第 2 阶段(第 41 ~80 d) 和第 3 阶段(第 81 ~120 d) 中,每循环的总时长仍为 6 h,其中进水段、厌氧段、硝化液回流、静置和排水段时长与第 1 阶段中的时长相等,供氧区 DO 浓度分别设置为 1 ~2 mg•L^{-1}和低于 1 mg•L^{-1}. 为了保证供氧量充足,在第 2 阶段中将供氧段和缺氧段均分成 2 段,每个供氧段和缺氧段时长均设置为 60 min; 在第 3 阶段中将供氧段和缺氧段均分成 3 段,每个供氧段和缺氧段时长均设置为 40 min. 反应器运行期间,污泥浓度始终维持在3 500 mg•L^{-1}左右,污泥龄为 25 d,水力停留时间为 12 h,反应器内温度稳定维持在 25℃左右.

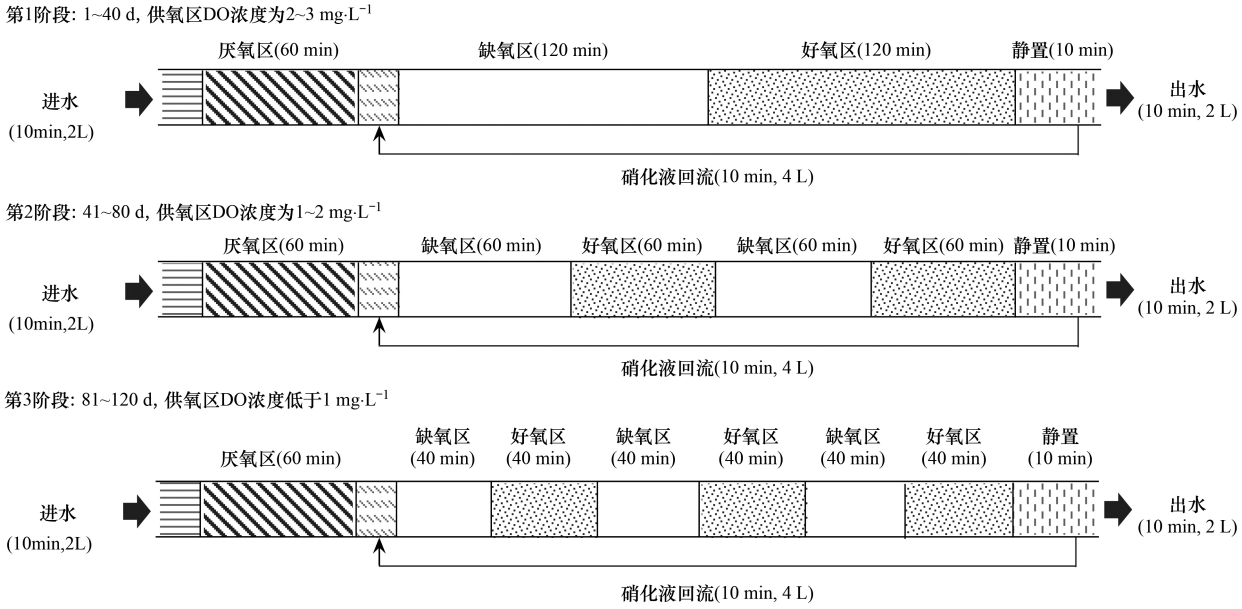


图 1　反应器运行工况

Fig. 1　Operational conditions

1.2　原水成分与接种污泥

本研究中采用人工配置的生活污水进行实验. 进水中化学需氧量(chemical oxygen demands, COD) 、NH_4^+-N浓度和总磷(total phosphorus, TP) 浓度分别约为 120、40 和 6 mg•L^{-1},其中包含以下成分: 154 mg CH_3COONa、153 mg NH_4^+-N、26 mg KH_2PO_4 和 1 mL 微量元素溶液, C/N 比为 3. 每升微量元素溶液包含成分: 35 mg $CuCl_2$•$2H_2O$、36 mg $NiCl_2$•$6H_2O$、5 000 mg $MgSO_4$•$7H_2O$、6 000 mg $FeCl_2$•$4H_2O$、880 mg $CoCl_2$•$4H_2O$、100 mg H_3BO_3、100 mg $ZnSO_4$•$7H_2O$ 和 500 mg $MnCl_2$•$4H_2O$. 接种污泥取自西安市第五污水处理厂中 A/A/O 工艺,该系统中优势的反硝化细菌属于 *Thauera* 和 *Zoogloea* 菌属,优势硝化细菌属于 *Nitrosomonas* 和 *Nitrospira* 菌属,优势聚磷菌属于 *Candidatus Accumulibacter* 和 *Tetrasphaera* 菌属.

1.3　分析方法

水样测试前,用 0.45 μm 的滤膜进行过滤处理. 样品中NH_4^+-N、NO_2^--N、NO_3^--N、TP、COD 和污泥浓度(mixed liquid solid suspension, MLSS) 的含量参照标准方法进行测定[15]. NH_4^+-N、NO_2^--N和NO_3^--N浓度的总和计为总氮(total Nitrogen, TN) 的浓度. 采用气相色谱仪(安捷伦 GC7890) 测定活性污泥微生物中聚羟基脂肪酸酯(polyhydroxyalkanoates, PHA) 的含量[16]. 污水的 DO 浓度采用 HQ30d 分析仪(HACH, USA) 进行测量.

1.4　计算方法

除磷作用内碳源消耗占比的计算方法[11]:

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$消耗占比 = \frac{\Delta TP_{释} / COD_{内碳源}}{0.5} \times 100\%$$

式中，$\Delta TP_{释}$ 为厌氧区释磷量（以 P 计，mol）；$COD_{内碳源}$ 为厌氧段微生物合成内碳源消耗的有机物（以 C 计，mol）；0.5 为聚磷菌（phosphorus accumulating organisms，PAOs）释磷过程中释磷量和内碳源消耗的比例.

1.5 DNA 提取和高通量测序方法

在反应器运行的第 40、80 和 120 d 分别对 3 种工况条件下的微生物样本进行采集. 采用 Power Soil DNA isolation kit（MO biomedicals，USA）试剂盒提取活性污泥样本微生物 DNA. 采用 16S rRNA 高通量测序方法分析微生物群落结构. 采用通用引物 314F（CCTACGGGNGGCWGCAG）和 518R（GACT ACHVGGGTATCTAATCC）对 16S rRNA 的 V3-V4 区进行扩增. 高通量测序分析由 Novogene（Beijing，China）生物公司完成，测序平台为 Illumina MiSeq. 基因片段合成采用 FLASH 软件完成. 序列信息采用微生物生态学定量分析软件包（QIIME）分析. 采用 PICRUSt（phylogenetic investigation of communities by reconstruction of unobserved states）的方法进行功能预测. RDA 分析使用 vegan 包中的 RDA 函数进行[17]. 统计学分析采用 SPSS 20.0 软件.

2 结果与讨论

2.1 不同 DO 浓度下低碳源城市污水处理效果

为了研究 DO 浓度对活性污泥系统低碳源城市污水处理效果的影响，将具有良好脱氮除磷效率的 SBR 反应器在 3 种 DO 浓度条件下运行，每日监测的进出水指标见图 2.

反应器运行过程中，进水中 COD 浓度和 TN 浓度的实际测量值分别约为 126 mg·L^{-1} 和 40 mg·L^{-1}，实测进水 C/N 比约为 3.16，进水水质与低碳源城市生活污水的水质条件基本一致. 在运行的第 1 阶段（第 1 ~ 40 d），供氧区 DO 浓度为 2 ~ 3 mg·L^{-1}，系统具有较高的硝化效果，反应器出水中 NH_4^+-N 与 NO_2^--N 的浓度始终维持在 1 mg·L^{-1} 以下. 进水中碳源浓度影响了反硝化和除磷的效果，出水中 NO_3^--N、TN 和 TP 的浓度分别约为 14.11、14.52 和 3.02 mg·L^{-1}，TN 和 TP 的去除率为 61.96% 和 49.1%. 反应器运行至第 41 d（第 2 阶段），将供氧区 DO 浓度降低至 1 ~ 2 mg·L^{-1}. 该阶段中系统的出水中 NH_4^+-N 浓度约为 1.26 mg·L^{-1}；NO_3^--N、TN 和 TP 的浓度分别为 12.77、13.5 和 2.91 mg·L^{-1}，均低于第 1 阶段出水各项指标. 总氮和总磷的去除效率分别为 64.62% 和 53.35%，较第 1 阶段分别升高

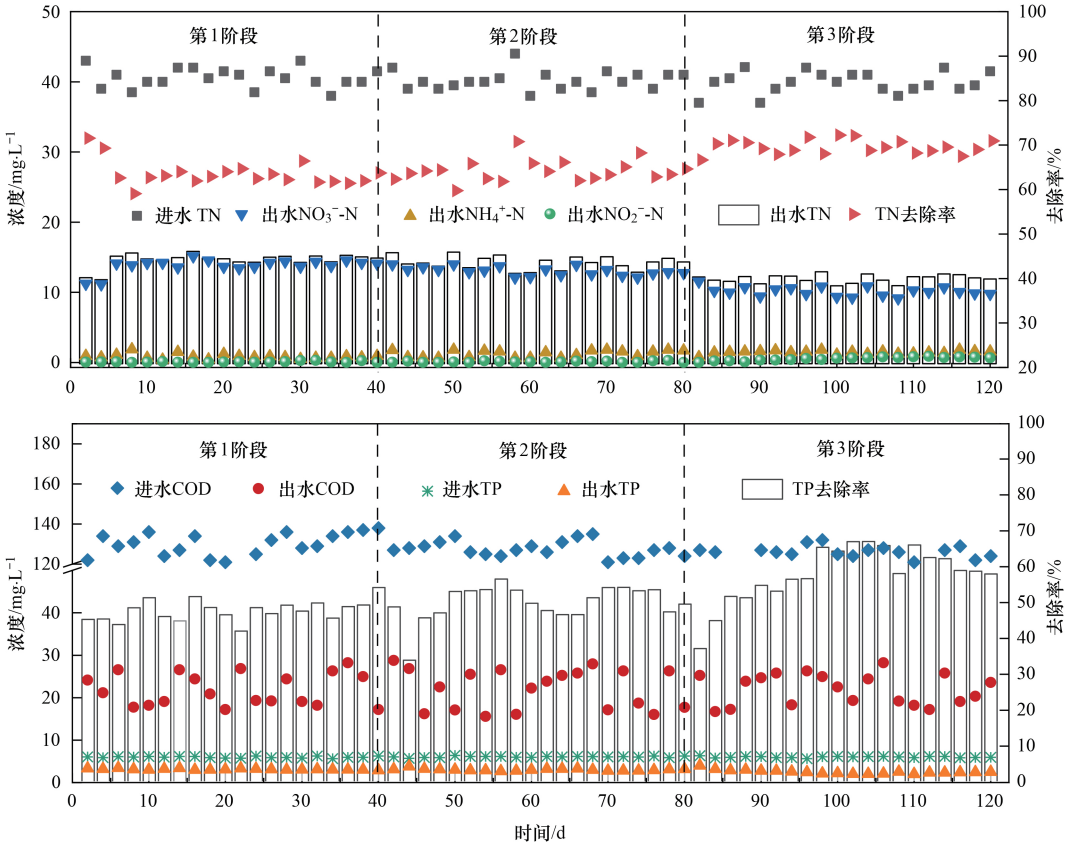


图 2 不同 DO 浓度条件下低碳源城市污水处理系统脱氮除磷效率

Fig. 2 Nitrogen and phosphorus removal efficiency of the low carbon/nitrogen wastewater treatment system with different DO conditions

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

了 2.66% 和 4.25%.

反应器运行至第 81 d(第 3 阶段)，供氧区 DO 浓度被进一步调整至 1 mg·L^{-1}以下. 随着供氧区 DO 浓度的降低，出水中NH_4^+-N浓度仍稳定在 1.23 mg·L^{-1}左右，氨氮的去除效率与前两个运行阶段持平；NO_3^--N和 TN 的浓度进一步降低至 9.81 mg·L^{-1}和 12.07 mg·L^{-1}，TN 的去除效率较第 1 和第 2 阶段分别约升高了 7.21% 和 6.29%. 此外，该阶段中，出水中总磷的浓度降低至 2.03 mg·L^{-1}左右，TP 的去除效率(约为 62.02%)明显高于另两个运行阶段. 有研究表明，将供氧区 DO 浓度维持在 1 mg·L^{-1}以下，活性污泥系统的脱氮除磷性能可以得到提升，与本研究得出的结果一致[18,19]. 综上所述，降低活性污泥系统供氧区 DO 浓度能够提升其对低碳源城市污水的处理效果. 低 DO 浓度条件下处理效率的提升可能是由于活性污泥系统内氮磷污染物去除途径得到优化，进而使系统内微生物的生长与代谢特性产生变化[20].

2.2　不同 DO 浓度条件下物质转化途径差异分析

通过分析反应器运行各阶段典型周期中氮磷污染物和有机物浓度的变化(图 3)，对不同 DO 浓度条件下低碳源城市污水处理系统脱氮除磷途径进行对比，结果展示在表 1.

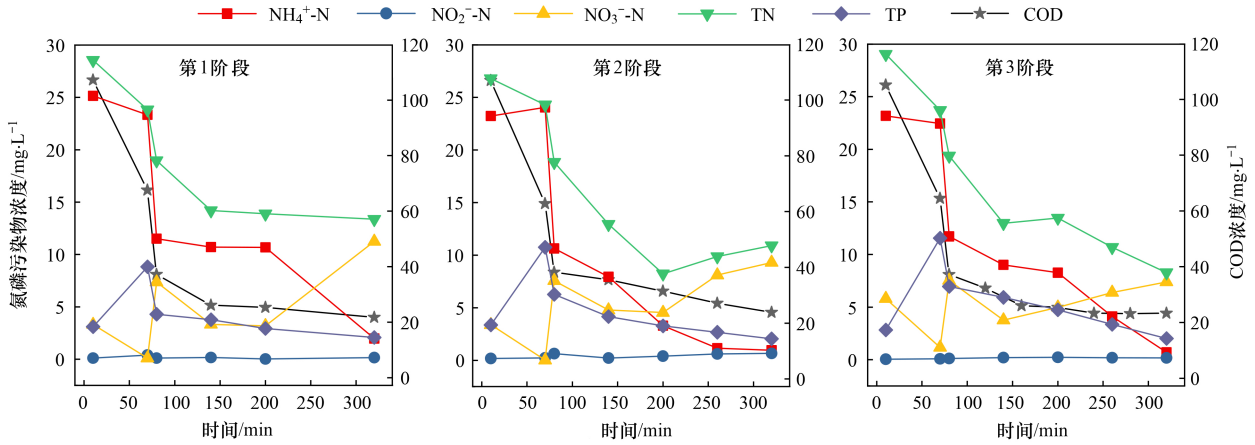


图 3　典型周期中物质浓度变化

Fig. 3　Variation of nitrogen, phosphorus, and organic carbon concentrations during a typical operational cycle

反应器运行的 3 个阶段中，厌氧段的初始 COD 浓度均约为 107 mg·L^{-1}，厌氧段结束后系统中 COD 的浓度均在 56 mg·L^{-1}左右. 部分碳源以 PHA 的形式储存于好氧聚磷菌或者反硝化聚磷菌细胞内，并通过该两种功能菌的生化作用参与生物脱氮除磷过程. 如图 3 所示，在反应器运行的第 1 阶段(供氧区 DO 浓度为 2 ~ 3 mg·L^{-1})，厌氧段释磷量与 PHA 合成量($PHA_{合成}$，以 C 计)最低，分别为 5.73 mg·L^{-1}和 20.16 mmol·d^{-1}. 随着供氧区 DO 浓度的下降，$PHA_{合成}$和厌氧段释磷量升高. 当供氧区 DO 浓度降低至 1 mg·L^{-1}以下(第 3 阶段)厌氧段释磷量与$PHA_{合成}$均达到最高值，分别为 7.39 mg·L^{-1}和 43.20 mmol·d^{-1}. 3 种 DO 浓度条件下除磷利用的内碳源占比($COD_{PHA/内碳源}$)分别为 28.46%、32.96% 和 42.35%，内碳源的除磷利用效率随着供氧区 DO 浓度的下降升高了 13.89%. 生物吸磷作用存在于供氧段和缺氧段，供氧区 DO 浓度降低至低于 1 mg·L^{-1}后(第 3 阶段)吸磷量(phosphorus uptake amount, PUA)为 4.94 mg·L^{-1}，高于第 1 和第 2 运行阶段. 在反应器运行的第 3 阶段中，PUA 与 PHA 消耗量的比值($PUA/PHA_{消耗}$，以 P/C 计)为 0.52 mol·mol^{-1}(表 1)，接近于文献[11]中好氧除磷过程的 $PUA/PHA_{消耗}$值(0.44 mol·mol^{-1})，结果说明在低 DO 浓度条件下除磷作用仍以好氧除磷为主. 随着 DO 浓度的降低 $PUA/PHA_{消耗}$呈现下降的趋势，在第 3 阶段达到最低. 有研究指出，低 DO 浓度条件促进反硝化除磷作用的发生，且反硝化除磷作用的 $PUA/PHA_{消耗}$(0.16 ~ 0.24 mol·mol^{-1})低于好氧除磷作用[21,22]. 因此，本研究中随着 DO 浓度降低 $PUA/PHA_{消耗}$数值下降是由反硝化除磷作用的除磷贡献率的增高引起.

除去厌氧段聚磷菌对碳源的消耗，处理系统进水中的碳源主要在微生物同化作用、好氧微生物氧化作用和反硝化细菌脱氮作用的过程中被消耗[23]. 碳源分配结果表明，各阶段中微生物同化作用消耗的碳源量在 364 ~ 388 mg·d^{-1}之间，说明各阶段微生物同化作用消耗的碳源量基本相同. 此外，随着供氧区 DO 浓度的降低，好氧段碳源氧化量由 266.11 mg·d^{-1}逐渐降低至 122.07 mg·d^{-1}. 该结果说明在低 DO 浓度的运行条件下好氧微生物氧化作用的碳源消耗量明显降低，使系统进水中碳源能够更充分地被利用于反硝化细菌的脱氮过程中，进而有效缓

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

解碳源不足对脱氮效果的影响. 碳源分配的优化也保障了有机物的处理效果的稳定.

反硝化功能菌可利用的碳源分为内碳源和外碳源两种,外碳源充足时反硝化细菌优先利用外碳源进行反硝化作用,外碳源被消耗至最低浓度后利用内碳源的反硝化作用成为主要的反硝化作用[24,25]. 因此,根据处理过程中碳源浓度变化情况,可将COD浓度降至最低值之前的脱氮量计为利用外碳源的反硝化量($\Delta TN_{外碳源}$),COD浓度维持在最低值阶段的反硝化量计为利用内碳源的反硝化量($\Delta TN_{内碳源}$). 根据典型周期中物质浓度变化情况可知,各阶段的COD浓度在反硝化阶段进行到60 min左右达到最低值. 如表1所示,随着供氧区DO浓度的降低,$\Delta TN_{外碳源}$升高了20.23%(由152.64 mg·d^{-1}升高至205.09 mg·d^{-1}),$\Delta TN_{内碳源}$升高了80.54%(由26.56 mg·d^{-1}升高至135.55 mg·d^{-1}). 此外,第3阶段的内碳源脱氮过程中,$\Delta TN_{内碳源}/PHA_{消耗}$(6.23 mg·mmol^{-1})明显高于供氧区DO浓度较高的两个阶段. 结果说明:降低供氧区DO浓度强化了脱氮功能微生物反硝化作用与内碳源的反硝化利用,进而使该系统对低碳源城市污水的脱氮效率得到强化.

表1 不同DO浓度条件下氮、磷污染物转化途径

Table 1 Nitrogen and phosphorus conversion pathways under different DO conditions

项目	第1阶段	第2阶段	第3阶段
微生物同化作用碳源消耗/mg·d^{-1}	364.71	368.84	387.31
$PHA_{合成}$/mmol·d^{-1}	20.16	26.40	43.20
$\Delta TP_{释}/COD_{内碳源}$/mol·mol^{-1}	0.14	0.16	0.21
$COD_{PHA/内碳源}$/%	28.46	32.96	42.35
$PUA/PHA_{消耗}$/mol·mol^{-1}	0.61	0.58	0.52
好氧段COD消耗量/mg·d^{-1}	266.11	158.14	122.07
$\Delta TN_{外碳源}$/mg·d^{-1}	152.64	188.80	205.09
$\Delta TN_{内碳源}$/mg·d^{-1}	26.56	64.96	135.55
$\Delta TN_{内碳源}/PHA_{消耗}$/mg·mmol^{-1}	3.19	3.90	6.23

2.3 DO浓度对脱氮功能微生物群落结构的影响

高通量测序结果显示,反应器运行3个阶段中微生物群落的Shannon指数分别为5.50、5.65和6.31. Shannon指数代表着微生物多样性的丰富程度. 门水平微生物群落结构如图4所示,在反应器运行的第一阶段中,优势微生物属于Bacteroidetes门(43.04%),Proteobacteria门(41.59%)的微生物相对丰度次之. 随着供氧区DO浓度降低,Proteobacteria门微生物相对丰度升高了19.96%,并逐渐占据优势. 科水平微生物群落结构如图4,在3个运行阶段中Saprospiraceae科、Competibacteraceae科和Rhodocyclaceae科均具有较高的相对丰度. 随着DO浓度的变化,科水平微生物的群落结构显著变化,Rhodocyclaceae科(相对丰度由35.27%降低至5.76%)的优势逐渐被Saprospiraceae科(相对丰度由18.85%升高至41.17%)代替. 本研究中,微生物群落结构的调整伴随着低碳源污水处理效率的提升,说明DO浓度的变化促使微生物更好地应对低碳源的环境.

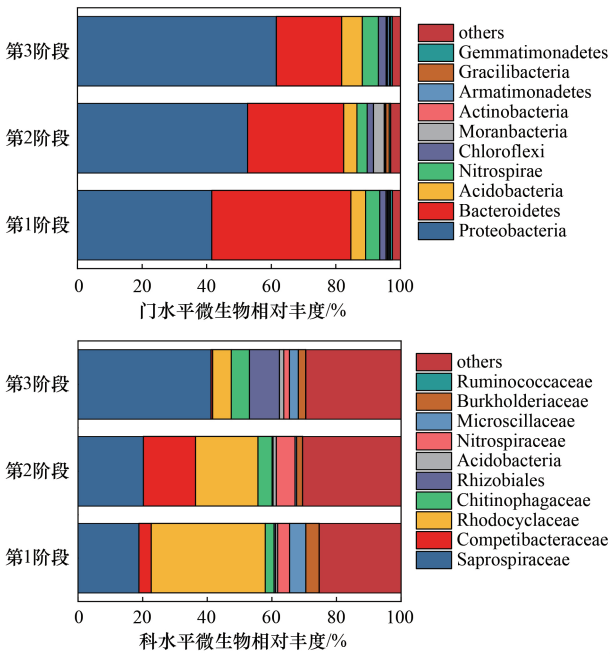


图4 门水平和科水平微生物相对丰度

Fig. 4 Relative abundance of microorganisms at the phylum level and family level

DO浓度不仅作为重要的环境因素影响脱氮功能微生物的生长,也通过影响系统内物质转化途径(如碳源消耗途径)改变反硝化细菌的代谢与生长特性,进而影响处理系统的脱氮性能[26,27]. 特别是在处理低碳源城市生活污水时,反硝化细菌丰度的降低成为处理效果低的重要原因. 因此,探究DO浓度对反硝化细菌生长特性的综合影响是提升低碳源污水处理效果的关键. 本研究中,对不同运行阶段中的反硝化细菌群落结构进行了分析,结果如图5所示. 当供氧区DO浓度在2~3 mg·L^{-1}范围内(第1

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

阶段)，系统中优势反硝化细菌为 *Thauera* 和 *Zoogloea* 菌属，反硝化细菌的总相对丰度为 10.24%. 当供氧区 DO 浓度调整至 1 ~ 2 mg•L^{-1}(第 2 阶段)，反硝化细菌的总相对丰度(11.07%)略有升高. 当供氧区 DO 浓度降低至 1 mg•L^{-1}以下(第 3 阶段)，*Dechloromonas* 成为优势反硝化细菌，反硝化细菌的总相对丰度进一步升高至 14.14%. *Dechloromonas* 是一种在低 DO 浓度条件下可以利用内碳源进行脱氮作用的反硝化细菌，该种功能菌受低碳源环境的影响较小[28]. 因此，在低 DO 浓度运行阶段(第 3 阶段)，反硝化细菌丰度的升高与反硝化细菌利用内碳源能力的增强密切相关.

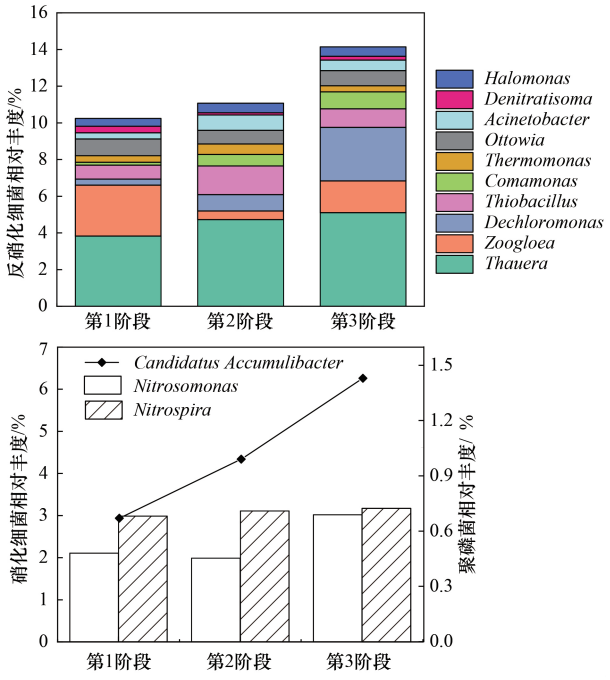


图 5　脱氮除磷功能微生物相对丰度(属水平)

Fig. 5　Relative abundance of functional microorganisms at the genus level

硝化细菌群落结构如图 5 所示，氨氧化细菌(ammonia oxidation bacteria, AOB)均主要属于 *Nitrosomonas* 菌属，AOB 在反应器运行期间相对丰度由 1.99% 升高至 3.02%. 亚硝态氮氧化细菌(nitrite oxidation bacteria, NOB)主要属于 *Nitrospira* 菌属，其在反应器运行的 3 个阶段中的相对丰度维持在 2.99% ~ 3.17%. 总体上，在处理低碳源城市污水时，供氧区 DO 浓度的下调促进了硝化细菌的生长. 有研究表明，低 DO 浓度的环境会对硝化细菌的生长产生抑制效应[29]，该结论不同于本研究得出的结论. 在进水碳源不充足的条件下，DO 浓度较高的两个阶段中反硝化效果低于低 DO 浓度阶段，导致该 2 个阶段中 pH 数值偏低. 3 个运行阶段中供氧区的 pH 值分别约为 6.35、6.50 和 6.83，该 pH 值与硝化细菌相对丰度间的 Pearson 相关系数为 0.952. 结果说明，低碳源条件下采用较高 DO 浓度的运行条件所引起的低 pH 环境，是第 1 和第 2 运行阶段中硝化细菌生长受到抑制的主要原因之一. 反应器微生物群落中主要的 PAOs 属于 *Candidatus Accumulibacter* 菌属，在低碳源的条件下 PAOs 的丰度随着供氧区 DO 浓度的降低呈现上升的趋势. 这一现象主要是由于采用低 DO 浓度的运行条件时碳源的除磷利用效率较高，有利于 PAOs 的生长. 综上所述，低 DO 浓度的环境有效地提升了脱氮除磷功能细菌在低碳源条件下的生长.

采用 RDA 分析，评价了供氧区 DO 浓度的变化对低碳源城市污水处理系统脱氮除磷功能微生物群落的影响程度. 结果显示(图 6)，DO 浓度与几种优势功能微生物呈负相关(即: 供氧区 DO 浓度越低越有利于该种属的微生物在低碳源环境下生长)，并且对功能微生物的群落结构影响显著. 多数的脱氮功能微生物丰度与系统的脱氮除磷的效率呈正相关(即: 该部分微生物的生长对脱氮除磷效率存在促进作用)，进而说明低碳源条件下城市污水处理系统供氧区采用低 DO 浓度的运行策略，能有效提升功能微生物对低碳源环境的适应，强化系统对低碳源污水的处理效果.

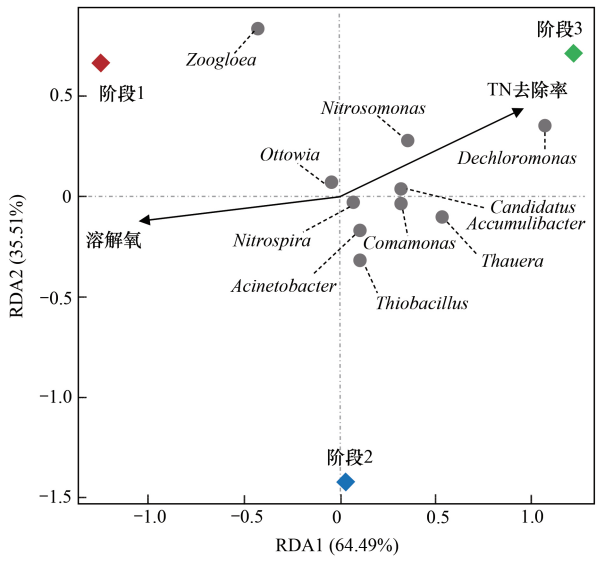


图 6　RDA 分析

Fig. 6　RDA analysis

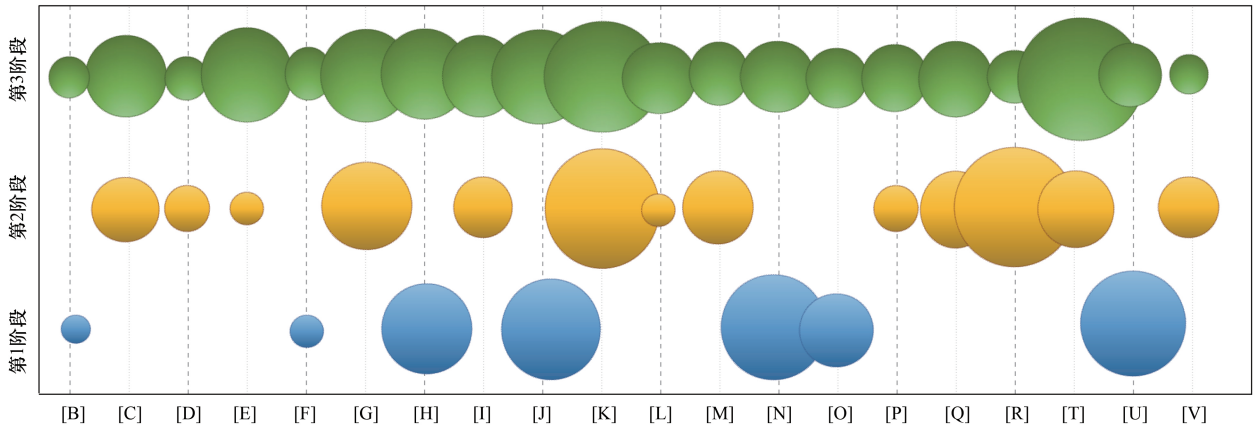
2.4　低碳源条件下 DO 浓度对微生物代谢的影响

为了阐明低碳源条件下供氧区 DO 浓度对微生物群落产生影响的原因，对微生物群落的基因功能进行预测与分析. 功能基因的预测以 COG 数据库为依据. 如图 7 所示，多数的代谢功能包含基因数量随着供氧区 DO 浓度的降低呈现增加趋势，说明在低碳源的条件下采用低 DO 浓度的运行策略会提升微

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

生物的代谢与应对不利环境的调控能力. 产生这一现象的主要原因是,在低 DO 浓度的兼性环境、许多的好氧和缺氧条件下进行的生化反应可以同步进行,微生物的代谢能力得到强化.

随着供氧区 DO 浓度降低而上调的代谢功能包含能量合成、碳水化合物代谢和信号传导等功能. 信号传导功能与微生物的物质利用以及应对外界环境变化紧密相关[30]. 因此, DO 浓度的差异不仅影响了微生物的基础代谢,也引起微生物物质利用和代谢调控能力的差异,进而对低碳源城市污水的处理效果产生影响. 在低碳源城市污水处理系统中,碳源不足是限制功能细菌生长与代谢的主要因素,碳源利用与功能菌碳水化合物代谢和能量代谢的能力直接相关[31]. 功能预测结果显示,该两种代谢功能所包含基因的数量在低 DO 浓度的条件下达到最高值,说明低 DO 浓度强化了微生物的碳源的利用能力. 因此,低 DO 浓度条件下碳源利用能力的增强是低碳源城市污水处理效率提升的原因之一. 综上所述,随着供氧区 DO 浓度的降低,微生物碳源利用及代谢调控能力均得到提升,进而使得低碳源条件下功能微生物生长和脱氮除磷效率得到强化.



圆圈面积代表样本的基因数量与 3 组中该种基因丰度的最低值间的差值

图 7 PICRUSt 功能基因预测

Fig. 7 PICRUSt genes prediction

3 结论

(1) 随着供氧区 DO 浓度的降低,低碳源城市污水处理系统脱氮和除磷效率分别提升了 7.21% 和 12.92%,利用外碳源和内碳源脱氮量分别升高了 20.23% 和 80.54%,内碳源除磷利用效率升高了 13.89%.

(2) 供氧区 DO 浓度降低促使反硝化细菌和聚磷菌丰度分别升高了 3.9% 和 0.79%,促使 *Dechloromonas* 和 *Candidatus Accumulibacte* 等功能微生物成为优势功能微生物,进而增强功能微生物群落应对低碳源环境的能力.

(3) 低 DO 浓度运行条件下,碳水化合物代谢、能量合成和基质运输等活性增强,提升了微生物群落碳源利用能力,保障功能微生物在低碳源条件下的稳定生长.

参考文献:

[1] 甄建园, 于德爽, 王晓霞, 等. 低 C/N(<3) 条件下 SNEDPR 系统启动及其脱氮除磷特性研究[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(8): 2960-2967.
Zhen J Y, Yu D S, Wang X X, *et al*. The nutrient removal characteristic of SNEDPR system during start-up and steady operation phases treating low C/N (<3) sewage [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(8): 2960-2967.

[2] Huang X, Dong W Y, Wang H J, *et al*. Biological nutrient removal and molecular biological characteristics in an anaerobic-multistage anaerobic/oxic (A-MAO) process to treat municipal wastewater[J]. Bioresource Technology, 2017, **241**: 969-978.

[3] 周爱姣, 陶涛, 张太平, 等. A-A^2/O 工艺处理低碳源城市污水的除磷脱氮效果[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(12): 150-152.
Zhou A J, Tao T, Zhang T P, *et al*. Removal effect of nitrogen and phosphorus of A-A^2/O process on treating urban wastewater with low carbon [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **31**(12): 150-152.

[4] 黄有文, 张立秋, 李淑更, 等. 固体碳源生物膜处理低碳城市污水脱氮性能[J]. 水处理技术, 2017, **43**(11): 98-102.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Huang Y W, Zhang L Q, Li S G, *et al*. Performance of nitrogen removal from municipal wastewater by solid carbon source biofilm [J]. Technology of Water Treatment, 2017, **43**(11): 98-102.

[5] 彭永臻, 马斌. 低 C/N 比条件下高效生物脱氮策略分析 [J]. 环境科学学报, 2009, **29**(2): 225-230.
Peng Y Z, Ma B. Review of biological nitrogen removal enhancement technologies and processes under low C/N ratio [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, **29**(2): 225-230.

[6] 张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 等. 低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响 [J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3356-3364.
Zhang X R, Chi Y L, Wang Q, *et al*. Effects of aeration strategy on denitrifying performance of activated sludge processes in treating low-carbon-source municipal wastewater [J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3356-3364.

[7] Lochmatter S, Gonzalez-Gil G, Holliger C. Optimized aeration strategies for nitrogen and phosphorus removal with aerobic granular sludge [J]. Water Research, 2013, **47**(16): 6187-6197.

[8] Guo C Z, Fu W, Chen X M, *et al*. Nitrogen-removal performance and community structure of nitrifying bacteria under different aeration modes in an oxidation ditch [J]. Water Research, 2013, **47**(11): 3845-3853.

[9] 杨伟强, 王冬波, 李小明, 等. 低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究 [J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1492-1498.
Yang W Q, Wang D B, Li X M, *et al*. Optimization study on the nitrogen and phosphorus removal of modified two-sludge system under the condition of low carbon source [J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1492-1498.

[10] 吴昌永, 彭永臻, 王然登, 等. 溶解氧浓度对 A^2/O 工艺运行的影响 [J]. 中国给水排水, 2012, **28**(3): 5-9.
Wu C Y, Peng Y Z, Wang R D, *et al*. Effect of dissolved oxygen concentration on performance of A^2/O process [J]. China Water & Wastewater, 2012, **28**(3): 5-9.

[11] Wang X X, Wang S Y, Xue T L, *et al*. Treating low carbon/nitrogen (C/N) wastewater in simultaneous nitrification-endogenous denitrification and phosphorous removal (SNDPR) systems by strengthening anaerobic intracellular carbon storage [J]. Water Research, 2015, **77**: 191-200.

[12] Keene N A, Reusser S R, Scarborough M J, *et al*. Pilot plant demonstration of stable and efficient high rate biological nutrient removal with low dissolved oxygen conditions [J]. Water Research, 2017, **121**: 72-85.

[13] Cao Y F, Zhang C S, Rong H W, *et al*. The effect of dissolved oxygen concentration (DO) on oxygen diffusion and bacterial community structure in moving bed sequencing batch reactor (MBSBR) [J]. Water Research, 2017, **108**: 86-94.

[14] 郭云, 杨殿海, 卢文健. 城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析 [J]. 环境科学, 2012 **33**(8): 2709-2714.
Guo Y, Yang D H, Lu W J. Analysis of microbial community structure at full-scale wastewater treatment plants by oxidation ditch [J]. Environmental Science, 2012, **33**(8): 2709-2714.

[15] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[16] Oehmen A, Zeng R J, Yuan Z G, *et al*. Anaerobic metabolism of propionate by polyphosphate-accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, **91**(1): 43-53.

[17] Zhang L, Shen Z, Fang W K, *et al*. Composition of bacterial communities in municipal wastewater treatment plant [J]. Science of The Total Environment, 2019, **689**: 1181-1191.

[18] Ma Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al*. Achieving nitrogen removal via nitrite in a pilot-scale continuous pre-denitrification plant [J]. Water Research, 2009, **43**(3): 563-572.

[19] 赵丽君, 方芳, 郭劲松, 等. 溶解氧对 SBR 脱氮性能与脱氮方式的影响 [J]. 环境工程学报, 2015, **9**(3): 1148-1154.
Zhao L J, Fang F, Guo J S, *et al*. Impacts of dissolved oxygen level on nitrogen remval efficiencies and pathways in a sequential batch reactor [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(3): 1148-1154.

[20] 张雯, 邓风, 徐华. 间歇曝气和连续曝气对完全混合式反应器系统脱氮性能的影响 [J]. 环境化学, 2013, **32**(11): 2176-2185.
Zhang W, Deng F, Xu H. The impact of intermittent aeration and continuous aeration on CSTR system denitrification performance [J]. Environmental Chemistry, 2013, **32**(11): 2176-2185.

[21] Guisasola A, Qurie M, Del Mar Vargas M, *et al*. Failure of an enriched nitrite-DPAO population to use nitrate as an electron acceptor [J]. Process Biochemistry, 2009, **44**(7): 689-695.

[22] 吕小梅. 反硝化除磷菌群结构与工艺调控策略 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
Lv X M. Microbial community structure and process control strategy of denitrifying phosphorus removal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[23] 付国楷, 张春玲, 喻晓琴, 等. 低碳源城市污水厂碳源优化利用运行模式研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, **39**(8): 61-66.
Fu G K, Zhang C L, Yu X Q, *et al*. Research on the optimum operation strategy for deficient carbon source urban sewage treatment plants [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012, **39**(8): 61-66.

[24] 李冬, 刘博, 王文琪, 等. 除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺 [J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 867-875.
Li D, Liu B, Wang W Q, *et al*. Simultaneous short-cut nitrification-denitrification phosphorus removal granules induced by phosphorus removal granules [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 867-875.

[25] 韦佳敏, 刘文如, 程洁红, 等. 反硝化除磷的影响因素及聚磷菌与聚糖菌耦合新工艺的研究进展 [J]. 化工进展, 2020, **39**(11): 4608-4618.
Wei J M, Liu W R, Cheng J H, *et al*. Influencing factors of denitrifying phosphorus removal and advance research on novel process of coupling PAOs and GAOs [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, **39**(11): 4608-4618.

[26] Guo J B, Cong Q W, Zhang L H, *et al*. Exploring the linkage between bacterial community composition and nitrous oxide emission under varied DO levels through the alternation of aeration rates in a lab-scale anoxic-oxic reactor [J]. Bioresource Technology, 2019, **291**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121809.

[27] Jin P K, Wang X B, Wang X C, *et al*. A new step aeration approach towards the improvement of nitrogen removal in a full scale Carrousel oxidation ditch [J]. Bioresource Technology, 2015, **198**: 23-30.

[28] Zhao J, Wang X X, Li X Y, *et al*. Improvement of partial nitrification endogenous denitrification and phosphorus removal system: Balancing competition between phosphorus and glycogen accumulating organisms to enhance nitrogen removal without

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

initiating phosphorus removal deterioration [J]. Bioresource Technology, 2019, **281**: 382-391.
[29] Jiang C C, Xu S J, Wang R, *et al*. Achieving efficient nitrogen removal from real sewage via nitrite pathway in a continuous nitrogen removal process by combining free nitrous acid sludge treatment and DO control [J]. Water Research, 2019, **161**: 590-600.
[30] Monedero V, Revilla-Guarinos A, Zuniga M. Physiological role of two-component signal transduction systems in food-associated lactic acid bacteria [J]. Advances in Applied Microbiology, 2017, **99**: 1-51.
[31] Huang W, Gong B Z, Wang Y M, *et al*. Metagenomic analysis reveals enhanced nutrients removal from low C/N municipal wastewater in a pilot-scale modified AAO system coupling electrolysis [J]. Water Research, 2020, **173**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115530.

《环境科学》连续 9 次荣获“中国最具国际影响力学术期刊”称号

2020 年 12 月 17 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2020 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果. 《环境科学》荣获“2020 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 9 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5%(Top5%)的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net